

07 16 49 2-/

На правах рукописи

АГАРЫШЕВ Анатолий Иванович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНОГО
РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В НЕОДНОРОДНОЙ
ИОНОСФЕРЕ**

Специальность 05.12.01. - Теоретические основы радиотехники

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**



Казань -- 2000

Работа выполнена в Иркутском государственном техническом университете

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор В.А. Иванов /г. Йошкар-Ола/

доктор физико-математических наук,
профессор Р.Г. Минуллин /г. Казань/

доктор технических наук Ю.А. Чернов /г. Москва/

Ведущая организация: Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Защита диссертации состоится "27" апреля 2000 г. в 14 час. в
210 ауд. физического факультета КГУ на заседании диссертационного совета
Д053.29.05 по специальности 05.12.01 – теоретические основы радиотехники
при Казанском государственном университете по адресу: 420 008, г. Казань, ул.
Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им.
Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан

"25" марта 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

В.С. Бухмин

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



870067

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. В настоящее время разработана теория распространения декаметровых радиоволн для моделей регулярной ионосферы, на основе чего прогнозируются характеристики радиоволн - напряженности поля E , максимально применимые частоты (МПЧ), углы излучения η и приема β в вертикальной плоскости, групповые задержки t . Такие прогнозы необходимы для проектирования и эксплуатации радиотехнических систем диапазона 3-30 МГц. Однако в экспериментах обнаружены существенные ошибки известных прогнозов характеристик радиоволн, особенно для трасс длиной $D > 2000$ км. Поэтому актуальны разработки методов, позволяющих уменьшить эти ошибки, что возможно при прогнозировании влияния регулярной и случайной неоднородности ионосферы на средние характеристики радиоволн.

Такие прогнозы необходимы прежде всего для угловых характеристик радиоволн, наиболее чувствительных к неоднородности среды. На трассах длиной $D < 1500$ км достаточную для решения практических задач точность расчета углов η и β обеспечивают известные теоремы эквивалентности, что подтверждено экспериментально. Необходимость уточнения расчетов и прогнозов этих углов на более длинных трассах впервые показана при исследованиях по теме диссертации на основе анализа экспериментальных данных, полученных для различных условий и способов распространения радиоволн.

Известно, что превышения максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) радиоволн над классическими МПЧ, обусловленными рефракцией радиоволн в регулярной ионосфере, растут с ростом длины трассы из-за влияния случайных неоднородностей среды. Поэтому для $D > 2000$ км важны разработанные в диссертации прогнозы МНЧ при заданных порогах чувствительности аппаратуры, что позволит использовать диапазон рабочих частот $f > \text{МПЧ}$, где меньше поглощение радиоволн и легче найти свободную от помех полосу частот.

Для прогностических задач актуальны исследования влияния случайных неоднородностей ионосферы на средние характеристики радиоволн. Ранее считалось, что эти неоднородности приводят к флуктуациям сигнала, искажают форму импульсов, частотные и фазовые спектры, но для $f < \text{МПЧ}$ не меняют средние характеристики радиоволн. Однако в диссертации для трасс $D > 2000$ км показаны существенные систематические отличия измеренных характеристик радиоволн от рассчитанных для регулярной среды. Выяснение причин этих отличий важно для более глубокого понимания процессов распространения радиоволн и повышения точности прикладных прогнозов характеристик радиоволн.

За последние годы повысился интерес к исследованиям распространения радиоволн верхним лучом (работы В.П. Урядова, Ю.Н. Черкашина, В.А. Иванова), что обусловлено существенным влиянием случайных неоднородностей ионосферы на этот вид распространения. Пониманию особенностей прогнозирования этого влияния способствуют приведенные в диссертации результаты измерений угловых и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) верхних лу-

чей. Отметим и возрождение интереса к исследованиям сверхдальнего распространения радиоволн, связанное с ЛЧМ-зондированием ионосферы (эксперименты МарГТУ, ИСЗФ СО РАН). Результаты диссертации показывают особенности влияния цикла солнечной активности на прогнозы характеристик такого распространения, что связано с изменением типов траекторий радиоволн.

Возможности исследования и практического применения дальнего распространения радиоволн ограничены сложностью модели регулярной ионосферы и методов расчета характеристик радиоволн. Введение в эту модель случайных неоднородностей плотности электронов N еще более усложняет вычисления. Поэтому важное значение имеет разработка и экспериментальная проверка оперативных (быстродействующих) методов прогнозирования характеристик радиоволн, учитывающих неоднородность среды на физическом уровне строгости. Представляет интерес и применение этих методов для диагностики ионосферы по измеренным характеристикам наклонного зондирования (НЗ), что дает ряд преимуществ по сравнению с вертикальным зондированием (ВЗ).

Цель диссертации заключается в разработке технических и методических основ долгосрочного и оперативного прогнозирования характеристик дальнего распространения радиоволн с учетом регулярной и случайной неоднородности среды, а также в разработке вопросов применения этих прогнозов для проектирования и эксплуатации радиотехнических систем диапазона 3-60 МГц.

Для достижения цели работы были решены следующие задачи.

1. Измерены характеристики радиоволн для различных способов и условий распространения радиоволн на дальних и сверхдальних трассах.

2. На основе анализа результатов измерений и расчетов показано существенное влияние регулярной и случайной неоднородности ионосферы на средние характеристики дальнего распространения радиоволн.

3. Разработаны модели неоднородной структуры ионосферы, применимые для радиопрогнозов на дальних трассах, и методы определения параметров этих моделей по данным НЗ и ВЗ ионосферы.

4. Разработаны и экспериментально проверены оперативные методы расчета и прогноза характеристик радиоволн, учитывающие неоднородность среды.

5. Разработаны вопросы применения усовершенствованных радиопрогнозов.

Методы исследований заключались в разработке методик экспериментов, проведении измерений и анализе полученных результатов. Особое внимание уделено угловым характеристикам радиоволн, которые более чувствительны к влиянию неоднородности среды по сравнению с другими характеристиками и дают новую информацию о случайных неоднородностях ионосферы. Разрабатывались модели регулярной и случайно-неоднородной ионосферы, обеспеченные исходными данными для конкретных ситуаций, и оперативные методы расчета характеристик радиоволн, применение которых позволило сравнить измеренные и рассчитанные характеристики для большого набора (~1000) разных ситуаций. Использовались результаты численного моделирования распрост-

ранения радиоволн в сочетании с полуэмпирической моделью регулярной ионосферы (ПЭМИ), разработанной в ИГУ под руководством В.М. Полякова. Анализировались измеренные и рассчитанные характеристики радиоволн и данные о случайной возмущенности ионосферы, для чего разработаны методы диагностики параметров регулярной и случайно-неоднородной структуры ионосферы по данным НЗ. Выполнялось моделирование процесса распространения радиоволн на основе разработанных методов и результатов такой диагностики.

Научную новизну работы определяют измерения угловых характеристик для разных способов и условий распространения радиоволн и разработки методов оперативного расчета и прогноза характеристик радиоволн, что позволило:

- 1) выявить ряд аномальных особенностей регулярных изменений углов прихода радиоволн, не прогнозируемых на основе моделей регулярной среды;

- 2) обнаружить существенные систематические изменения углов места для модов $1F_2, 2F_2, 3F_2$ в течение суток и показать возможности прогнозирования этих изменений на основе моделей регулярной и случайной ионосферы;

- 3) обнаружить зависимости характеристик сверхдальнего распространения радиоволн от уровня солнечной активности и объяснить их повышением роли траекторий, рикошетирующих над поглощающими слоями ионосферы и возбуждаемых при рассеянии радиоволн неоднородностями ионосферы;

- 4) показать увеличение предельной дальности распространения модами $1F_2, 1E, 1E_s$, обусловленное влиянием случайных неоднородностей среды;

- 5) разработать оперативные методы прогнозирования средних характеристик радиоволн для $f > MUF$, в том числе метод равных MUF , рекомендованный Международным консультативным комитетом по радио (МККР);

- 6) показать, что поле радиоволн с $f \approx MUF$ формируется в пункте приема при отражениях от областей ионосферы с положительными возмущениями плотностей электронов N , что позволяет прогнозировать систематические превышения MUF при НЗ ионосферы над MUF , рассчитанными по данным ВЗ;

- 7) разработать методы определения параметров регулярной и неоднородной ионосферы, основанные на измерениях угловых характеристик радиоволн, в том числе принципиально новый метод измерений критических частот, и выявить прогнозируемые закономерности изменений рассеивающей способности ионосферы в зависимости от сезона, солнечной и геомагнитной активностей;

- 8) выявить закономерности влияния случайных неоднородностей ионосферы на характеристики верхних лучей, такие как диапазонное усиление и низкочастотная отсечка поля, линеаризация время-частотных характеристик (ВЧХ), уменьшение групповых задержек и расширение частотного диапазона приема, а также показать возможности прогнозирования этих эффектов;

- 9) показать возможности прогнозирования уменьшения напряженностей поля радиоволн на дальностях, близких к предельным для модов $1F_2, 2F_2$;

- 10) разработать методы оперативного прогноза характеристик радиоволн, основанные на определении эффективных индексов активности Солнца по из-

меренным МНЧ и эффективных параметров рассеяния радиоволн по ширинам их угловых спектров, превышениям МНЧ над МПЧ.

Достоверность результатов работы обусловлена: 1) сравнением результатов измерений и расчетов для большого числа ситуаций (разных трасс, модов, часов суток, месяцев, уровней солнечной активности и т.д.) и разных характеристик радиоволн (задержек, углов места, азимутов, их дисперсий, эффективных ширин углового спектра, напряженностей поля, задержек); 2) измерением угловых характеристик по методике, обеспечившей надежное выделение модов распространения; 3) интерпретацией большого числа характерных особенностей результатов измерений, в том числе для широко известных экспериментов.

Практическая ценность работы в том, что:

1) разработанные методы и алгоритмы прогнозов характеристик радиоволн реализованы в программном обеспечении, которое внедрено в НПО «Агат», НПО «Вектор», НИИ «Нептун», НИИ Систем связи и управления, Институте прикладной геофизики, НИИ Радио, ряде других предприятий и организаций;

2) результаты исследований использованы при выполнении договорных и госбюджетных НИР (№№ 76042385, 81100578, 01.87.0005628, 01.87.0006227);

3) результаты диссертационной работы используются в учебном процессе по кафедре радиоэлектроники и электрорадиоматериалов ИргТУ;

4) по результатам исследований сформулированы конкретные рекомендации, на основе которых можно оптимизировать частотно-угловые режимы работы и параметры аппаратуры дальней радиосвязи, пеленгации, локации.

Личное участие. Автор внес основной вклад в разработку методик и проведение экспериментов, результаты которых представлены в диссертации. Им полностью разработаны предлагаемые в диссертации оперативные методы и алгоритмы расчета и прогноза характеристик радиоволн, методы диагностики среды. Анализ результатов измерений и расчетов выполнен автором диссертации. Ему принадлежат все выводы и научные положения настоящей работы.

Защищаемые положения.

1. Случайные неоднородности среды меняют прогнозируемые средние характеристики радиоволн, в том числе для мода 1F2: увеличивают углы приема и предельные дальности распространения до 6° и 1000 км, уменьшают напряженность поля до 10-ти раз и задержки от верхнего луча (мода 1F2₁) до 500 мкс.

2. Средние характеристики радиоволн существенно меняются для траекторий распространения с углами, близкими к углам преломления и (или) к углам рикошетирувания над сферической поверхностью Земли.

3. Прогноз характеристик радиоволн с частотами выше МПЧ возможен на основе учета следующих эффектов: а) равенства расчетных МПЧ для отдельных скачков и МНЧ многоскачковой трассы; б) близости средних углов приема к критическим углам регулярной ионосферы; в) отражения радиоволн от областей ионосферы с положительными возмущениями плотности электронов.

4. Уточнение оперативных прогнозов характеристик радиоволн возможно на основе данных НЗ ионосферы при определении: а) эффективных индексов активности Солнца по измеренным МПЧ, МНЧ; б) эффективных критических частот ионосферы и параметров рассеяния радиоволн по углам места и ширинам углового спектра верхних лучей; в) эффективных наклонов в ионосферы по среднеквадратичным отклонениям азимутов нижних лучей.

Апробация работы. Основные результаты и выводы диссертации докладывались и обсуждались на XI, XII, XIV-XVI, XIX Всесоюзных и Всероссийских конференциях по распространению радиоволн (Казань, 1975, 1999 гг., Томск, 1978 г., Ленинград, 1984 г., Алма-Ата, 1987 г., Харьков, 1990 г.); объединенном семинаре «Распространение радиоволн в полярной и неоднородной ионосфере» (Звенигород, 1978, 1982 гг.); межведомственных совещаниях «Требования к моделям ионосферы при расчетах радиотрасс диапазона ДКВ в интересах проектирования и обслуживания специальных систем связи» (Москва, 1981 г.), «Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ диапазона» (Нижний Новгород, 1991 г.); II, III отраслевых конференциях «Состояние, результаты и перспективы использования научно-технических достижений фундаментальных и прикладных исследований по проблемам распространения радиоволн в разработках систем и аппаратуры передачи и обработки информации» (Москва, 1986, 1989 гг.); IV-VI Всесоюзных совещаниях «Специальные вопросы физики ионосферы и ионосферного распространения радиоволн» (Горький, 1983, 1986, 1989 г.); IV-VII Всесоюзных семинарах по ионосферному прогнозированию (Новосибирск, 1985 г., Суздаль, 1987 г., Мурманск, 1989 г., Иркутск, 1991 г.); Всесоюзном симпозиуме «Ионосфера и взаимодействие декаметровых радиоволн с ионосферной плазмой» (Звенигород, 1989 г.); Всесоюзном семинаре «Распространение радиоволн в ионосфере» (Калининград, 1989 г.); IV Международной научно-технической конференции «Распространение и дифракция электромагнитных волн в неоднородных средах» (Вологда, 1994 г.); Всесоюзной школе молодых ученых «Автоматизированные системы декаметровой радиосвязи» (Куйбышев, 1988 г.); научно-технической конференции «Проблемы и принципы построения пактных радиосетей» (Воронеж, 1993 г.), Российской научно-технической конференции по дифракции и распространению волн (Улан-Удэ, 1996 г.); The International Conference "Problems of Geocosmos" (St. Petersburg, Russia, 1996 г.); Международной конференции «Физика ионосферы и атмосферы Земли», посвященной 50-летию ионосферных исследований в г. Иркутске (Иркутск, 1998 г.), а также семинарах и конференциях в ИГУ, ИргТУ, ИСЗФ СО РАН, ИЗМИР РАН, ИВАИИ, НИРФИ, ГТУ, ХГУ, НИИР, ААНИИ и др.

Опубликовано 110 научных трудов, в том числе 60 статей в научных журналах и сборниках докладов, 50 тезисов. Основные публикации [1-71].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 7-ми разделов, заключения, содержит 254 страницы с текстом, 91 рисунок, 15 таблиц и список использованных источников из 240-ка наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и дан краткий обзор ситуации к началу работы по теме.

В разделе 1 обоснованы методы измерений характеристик радиоволн и приведены результаты измерений для среднеширотных трасс Хабаровск-Иркутск, Москва-Иркутск и Харьков-Иркутск длиной 2300 км, 4100 км и 4500 км.

В 1.1 дано краткое описание экспериментальной установки и методик измерений, в которых применялись передатчики мощностью ≈ 100 кВт, излучавшие импульсы длительностью 100 мкс. Угловые характеристики радиоволн измерялись фазоразностным методом по методике, позволившей исследовать их быстрые (время изменения $1\text{с} < t_v < 1\text{мин.}$), медленные ($1\text{мин.} < t_v < 1\text{ч}$), суточные и сезонные вариации. Для описания быстрых флуктуаций разностей фаз, измеренных в разнесенных антеннах, использована известная модель сигнала в виде пучка интерферирующих лучей с близкими амплитудами и случайными фазами. При этом средние значения разностей фаз φ_1 , φ_2 для двух ортогональных пар антенн соответствуют эффективному центру пучка лучей с углом места β и азимутом θ , а среднеквадратичные отклонения (σ_1 , σ_2) разностей фаз от средних φ – эффективным ширинам пучка по углу места (σ_β) и азимуту (σ_θ).

В 1.2 приведены методики измерений углов прихода, амплитуд и относительных задержек радиоволн, выполненных в течение 228 дней. Обоснованы формулы расчета β и θ по измеренным φ_1 и φ_2 с учетом неоднозначности отсчета φ . Показана возможность определения модов распространения при непрерывных наблюдениях за структурой импульсного сигнала и регистрации моментов, когда $f = \text{МНЧ}$ модов 1F2, 2F2, 3F2, либо МПЧ мода 1F2. Отмечены ситуации, когда измеренные углы места мода 2F2 растут, а задержки падают, что не объясняется на основе моделей регулярной ионосферы.

В 1.3 приведены экспериментальные данные о регулярных и случайных вариациях углов места β_1 , β_2 , β_3 , β_p модов 1F2, 2F2, 3F2, 1F2_p (индекс p соответствует верхнему лучу или лучу Педерсена) на трассе Хабаровск-Иркутск. Показано, что изменения средних значений β_1 и β_2 могут достигать 10° за сутки, а β_p – 18° , что важно учитывать при проектировании и эксплуатации приемо-передающих антенн, но такие изменения не прогнозируют известные методы, основанные на теоремах эквивалентности. Случайные вариации углов места характеризуются среднеквадратичными отклонениями (СКО) S_1 , S_2 , S_3 , S_p углов β_1 , β_2 , β_3 , β_p от соответствующих среднечасовых значений. Выявлены зависимости этих отклонений от сезона, времени суток и отношений $f/\text{МПЧ}$. Минимальные значения $S_1 \approx 0.8^\circ$ для мода 1F2 наблюдаются днем в равноденствие, а вечером зимой $S_1 \approx 2^\circ$. Показано превышение измеренных S_1 над рассчитанными по данным о вариациях действующих высот ионосферы. Отмечена аномалия регулярных вариаций углов места мода 1F2, обусловленных направленными вдоль трассы градиентами параметров ионосферы, знаки которых противоположны

утром и вечером. Показано, что диапазон суточных изменений β_1 максимален в октябре, а начиная с ноября уменьшается, хотя абсолютные значения градиентов растут вплоть до января. В феврале эти градиенты меньше, чем в январе, но диапазон суточных изменений β_1 больше, чем в январе.

В 1.4 разработана методика определения эффективных ширин конусов рассеяния радиоволн по углу места (σ_β) и азимуту (σ_θ). Методика основана на результатах фазоразностных измерений и модели сигнала, рассмотренной в 1.1. Для этой модели получено выражение, связывающее коэффициент корреляции поля p в разнесенных антеннах и дисперсию разностей фаз в этих антеннах:

$$\sigma_p^2 = \pi^2/3 - \pi \arcsin p + \arcsin^2 p - 0,5 \sum (p^n/n)^2,$$

где $p=1,2,3,\dots,\infty$ и $\sigma(1)=0$. После аппроксимации обратной зависимости $p(\sigma)$ получены формулы расчета σ_β и σ_θ по измеренным значениям σ_1, σ_2 , использованные при анализе результатов измерений на трассах различной длины.

В 1.5 анализируются регулярные и случайные вариации азимутов радиоволн на трассе Хабаровск-Иркутск. Показано, что при низкой и средней активности Солнца (индексы $W < 50$) систематические отклонения азимутов модов 1F2, 2F2, 3F2, 1F2 ρ от направления на передатчик θ_0 ($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_\rho$) по абсолютной величине меньше, чем случайные, характеризуемые СКО от $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_\rho$ (s_1, s_2, s_3, s_ρ). В такой ситуации прогноз Δ не повышает точность пеленгования. Показано, что s_1, s_ρ в равноденствие меньше, чем зимой, когда случайные неоднородности ионосферы наиболее интенсивны. Отмечено, что значения s_1 растут с увеличением отношений f/f_{MUF} , а s_ρ — уменьшаются, но всегда $s_1 < s_\rho < s_2 < s_3$.

Обнаружено систематическое отклонение азимутов верхних лучей к югу от θ_0 , растущее с ростом активности Солнца до значений $\Delta_\rho = 1.8^\circ \pm 0.2^\circ$, когда растут и Δ_1 до $1.1^\circ \pm 0.1^\circ$. Выявлена причина такого роста для широтных трасс с поперечными градиентами параметров параболической аппроксимации слоя F2 ионосферы, когда при $W > 100$ влияние этих градиентов на $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_\rho$ складывается, а при $W < 50$ влияние градиентов критических частот ионосферы f_o , всегда направленных к югу, компенсирует градиенты высот максимума и полутолщины слоя. Отмечено, что при $W > 100$ справедливы соотношения $|\Delta_{1(p)}| < s_{1(p)}$ и прогноз систематических отклонений азимутов к югу повысит точность пеленгования.

В 1.6 анализируются результаты измерений характеристик радиоволн для трасс Москва-Иркутск ($D_2=4100$ км) и Харьков-Иркутск ($D_3=4500$ км), которые принято считать двухскачковыми. Показано аномальное прохождение радиоволн с углами места в секторе 3-7°, наблюдаемое на трассе D3 днем в апреле при $f=1.1-1.3$ МГц 2F2, что объяснено в 5.2 прохождением мода 1F2. Для трассы D2 обнаружены существенные ($>20^\circ$) изменения измеренных углов места в течение суток, что не объясняют прогнозы для регулярной ионосферы. Эти прогнозы не дают и прохождение модом 1F2, наблюдаемое на трассе D2 при сильных продольных градиентах параметров ионосферы. Эти результаты объяснены в 3.6, 5.2 влиянием случайных неоднородностей ионосферы на углы места.

В разделе 2 анализируются результаты измерений характеристик радиоволн и результаты их расчета для моделей регулярной среды.

В 2.1 приведены оценки точности расчетов характеристик радиоволн на основе теорем эквивалентности, строго доказанных для плоско-слоистой среды. Обнаружены систематические ошибки расчета углов приема для мода 1F2, обусловленные нарушениями этих теорем в сферической ионосфере и регулярными изменениями N вдоль трассы. Показано, что для β_r эти ошибки в 2-3 раза больше, чем для β_i , хотя задержки между этими модами t_r рассчитываются достаточно точно, так как слабо зависят от горизонтальных градиентов N .

В 2.2 измеренные β_i сопоставлены с рассчитанными методом численного интегрирования лучевых уравнений (методом характеристик), строгим в приближении геометрической оптики. При использовании ПЭМИ обнаружена зависимость точности расчетов и прогнозов углов места мода 1F2 от сезона, когда в декабре, январе и феврале измеренные β_i в среднем на $2.6 \pm 0.8^\circ$ выше рассчитанных, а в другие месяцы это превышение $< 1^\circ$. Отмечено возможное влияние случайной неоднородности среды на средние углы приема, так как зимой измеренные медианы σ_β для мода 1F2 были $\approx 2^\circ$, а в равноденствие $\sigma_\beta < 0.5^\circ$.

Показано, что утром в январе 1979 г. расчетные углы места мода 1F2 в среднем на 6° меньше измеренных, а для мода 2F2 - на $\approx 7^\circ$ больше измеренных, хотя измеренные и рассчитанные β_r, t_r практически не отличаются. При этом β_2 растут с уменьшением отношений f/MUF_{2F2} , а для регулярной ионосферы эти углы убывают с уменьшением f/MUF_{2F2} . Измеренные σ_β для мода 2F2 растут с уменьшением этих отношений, хотя для мода 1F2 наблюдается с ратная зависимость. В результате обнаружен ряд систематических отличий измеренных характеристик от рассчитанных для регулярной ионосферы, что объяснено в 5.4.

В 2.3 разработаны оперативные методы расчета характеристик верхних лучей (модов 1F2_p) и выполнено сравнение результатов измерений и расчетов. В этих методах критические частоты f_0 , высоты максимума $N(h_m)$ и градиенты f_0 в направлении к передатчику (G) задаются в точке K пересечения прямой, проведенной под углом β_r и линии, задающей значения h_m на трассе распространения радиоволн. Углы места верхних лучей определяются из соотношения:

$$\cos \beta_r \approx \{ (1 + h_m/R_E)^2 (1 - \alpha^2) [1 - p^2 (\alpha^{-2} - 1)] / (G^2 + 1) \}^{1/2} - G \alpha (1 + h_m/R_E) / (G^2 + 1)^{1/2},$$

где R_E - радиус Земли, $\alpha = f_0/f$, $p = y_m / (R_E + h_m)$, y_m - полутолщина слоя F2.

Показано, что рассчитанные значения β_r в среднем на $1.2 \pm 0.4^\circ$ ниже измеренных. В 5.2 такое занижение объяснено фокусирующими свойствами крупномасштабных случайных неоднородностей (КМН) ионосферы на высотах максимума N . При расчетах азимутов верхних лучей учтены продольные и поперечные к трассе градиенты параметров слоя F2 ионосферы G_f, G_h, G_y :

$$\Delta \rho \approx \{ (G_f/f_0) [(D - L_1 - L_2) / (\alpha^{-2} - 1)^{1/2} - y_m] - 2G_h + G_y \} / [2 (\alpha^{-2} - 1)]^{1/2},$$

где $L_{1,2}$ - расстояния от приемника (передатчика) до точек K , определяемые при расчетах $\beta_{r1,2}$, а f_0, y_m, G_f, G_h, G_y заданы на расстоянии $(D + L_1 - L_2)/2$ от приемника.

Показано хорошее соответствие измеренных и рассчитанных Δp в предполуденные часы суток, но после полудня измеренные азимуты меньше рассчитанных и близки к направлению на передатчик, что, как показано в 5.2, можно объяснить зависимостью направлений движения КМН от времени суток. Разработан и экспериментально проверен оперативный алгоритм исчисления задержек верхних лучей, который уточняет расчеты по теоремам эквивалентности для сильных продольных градиентов параметров слоя F2 и основан на выражении:

$$t_p \approx t_1 + t_2 + f(D - L_1 - L_2) (\arcsin \alpha_1 - \arcsin \alpha_2) / [c(f_{01} - f_{02})],$$

($t_{1(2)}$ -задержки на пути приемник (передатчик) - точка $K_{1(2)}$ со скоростью света c).

В 2.4 на основе разработанных методов расчета β_p, τ_p исследована точность задания изменений критических частот f_0 вдоль трассы. Очевидно, что именно β_p, τ_p наиболее существенно зависят от f_0 и гораздо слабее - от других параметров ионосферы. При сравнении измеренных и рассчитанных β_p, τ_p показано, что лучшую точность задания сильных изменений f_0 вдоль трассы дает специальная обработка f -графиков ВЗ, что учитывает отличия этих изменений от квазилинейных, прогнозируемых известными моделями ионосферы. Зимним утром измеренные τ_p в среднем на 40 мкс меньше рассчитанных, а измеренные β_p - на 2-3° выше, что объяснено в 5.2 с учетом случайных неоднородностей ионосферы.

В 2.5 приведены известные ионограммы НЗ для верхних лучей на трассах длиннее 4000 км, где отсутствуют следы нижних лучей, экранированных сферической поверхностью Земли. Показано, что расчетные ионограммы имеют нелинейный участок для частот, близких к предельной частоте отражения регулярной ионосферой f_p , но экспериментальные ионограммы близки к линейным, а МНЧ на ≈ 2 МГц выше f_p , скорректированной по МНЧ2F2.

Рассмотрена ионограмма НЗ, где МНЧ на ≈ 15 МГц выше скорректированных расчетных МПЧ1F2, т.е. случайные неоднородности ионосферы весьма интенсивны, а измеренные τ_p при $f < \text{МПЧ}$ существенно ниже расчетных. Для трассы Москва-Иркутск показаны существенные отличия измеренных и рассчитанных АЧХ верхних лучей. Аномально низкие задержки $\tau_p < 200$ мкс наблюдались также на трассе Хабаровск-Иркутск при повышенной интенсивности случайных неоднородностей ионосферы, что показывают измеренные σ_f и σ_p .

В 2.6 анализируются известные результаты измерений характеристик распространения радиоволн модом. 1E_s. Отмечено существенное (до 2-х раз) превышение МНЧ над МПЧ, рассчитанными по плазменным частотам регулярного слоя E_s, а также превышение предельных дальностей прохождения, достигающее 300 км по сравнению с расчетами для регулярного слоя. Показано превышение измеренных углов места мода 1E_s над рассчитанными и несоответствие измеренных углов места χ групповых задержек для этого мода.

В 2.7 по данным из научной литературы анализируются отличия измеренных и рассчитанных напряженностей поля E для трасс длиной $D > 3000$ км. От-

мечено превышение расчетных средних значений E над измеренными, наиболее существенное (до 10 дБ) зимней ночью, когда случайные неоднородности ионосферы наиболее интенсивны. Такие превышения наблюдались зимней ночью и для $D \approx 7000$ км, когда для $D > 4000$ км наблюдался прием радиоволн с $f > f_r$.

Таким образом, имеется ряд существенных систематических отличий измеренных и рассчитанных характеристик радиоволн. Поэтому в заключении к разделу 2 сделан вывод о важности разработки прогнозов влияния случайных неоднородностей среды на средние характеристики радиоволн.

В разделе 3 исследовано влияние случайных неоднородностей ионосферы на характеристики радиоволн с $f \approx MUF$, разработаны и экспериментально проверены методы оперативных прогнозов МНЧ для модов 1F2, 2F2, 3F2.

В 3.1 дан обзор методов расчета МПЧ. Отмечено влияние горизонтальных градиентов параметров ионосферы на МПЧ, что впервые экспериментально подтверждено автором диссертации. Предлагается алгоритм расчета МПЧ1F2, учитывающий изменения критических частот f_0 и высот отражения радиоволн с $f \approx MUF(h_o)$ вдоль трассы, где M - прогнозируемый коэффициент $M(3000)F2$: $h_o \approx 1486/(M^2 - 1)^{1/2} - 176$, км; $MUF \approx 0,9 f_{OT}(1 + d/4 + d^2)(1 + tg^2 \phi)^{1/2}$; $tg \phi \approx \sin d \cos d_T / (H_o - \cos d \cos d_T)$; $d_T \approx tg \epsilon (1 + H_o^2 - 2H_o \cos d) / (H_o \cos d - 1)$; $H_o = 1 + h_o/R_E$; $tg \epsilon \approx \Delta h_o / \Delta D$, где $d = D/2R_E$, ϵ - угол эффективного «наклона» ионосферы в окрестности точки отражения T , $\beta_m \approx \pi/2 - d - \phi - d_T - \epsilon$ - угол приема радиоволны с $f \approx MUF$.

Показано, что такой учет практически исключает систематические отличия измеренных и рассчитанных МПЧ1F2. При этом средние отношения МНЧ к МПЧ для трасс $D = 2300 - 2800$ км меняются от 1,04 до 1,08, но средние отношения МНЧ2F2 к МПЧ2F2, рассчитанным для скачков равной длины, при сильных изменениях f_0 и h_o , по трассе достигают 1,6, что говорит о важности разработки более точного метода расчета и прогноза МНЧ2F2, выполненной в 3.4.

В 3.2 приведены результаты измерений угловых характеристик радиоволн с $f > MUF$. Показано, что средние углы места β_f выше средних углов β_i и близки к критическим углам регулярной ионосферы β_c , рассчитанным для пункта приема методом 2.3. При уменьшении напряженностей поля для $f > MUF$ наблюдался другой тип сигналов, когда измеренные β_f могли на 10° превышать β_c .

В 3.3 разработан метод расчета МНЧ1F2 и МНЧ односкачковых верхних лучей, основанный на условии $\beta_f \approx \beta_c$ (см. 3.2), которое учитывает случайные неоднородности среды. Приведены алгоритмы расчета МПЧ, МНЧ и углов места с $f \approx MUF$, основанные на прогнозируемых параметрах ионосферы.

В 3.4 предложен метод равных МПЧ, уточняющий прогнозируемые известными методами значения МНЧ и углов места модов 2F2, 3F2 благодаря учету неоднородности ионосферы, что особенно важно для сильных изменений параметров регулярной ионосферы вдоль трассы (см. 3.1). Метод основан на условии равенства расчетных МПЧ отдельных скачков с длинами D_i и МПЧ скачковой трассы в целом, что более строго обосновано в подразделе 5.4.

$$МПЧ_1(D_1) = МПЧ_2(D_2) = \dots = МПЧ_n(D_n) = МПЧ_n F_2, \quad \Sigma D_i = D$$

Обсуждаются отличия процессов формирования поля для $f > МПЧ_1 F_2$ и $f > МПЧ_2 F_2$, когда важно учитывать смещения точек отражения радиоволн от середины трассы в область более высоких значений f_0 . Отмечено, что для мода $2F_2$ это смещение гораздо сильнее, чем для мода $1F_2$, так как нет жестких ограничений на положения областей отражения радиоволн поверхностью Земли. При учете различий средних длин скачков объяснено отличие измеренных углов места модов $2F_2, 3F_2$ от рассчитанных для регулярной ионосферы (см. 2.2).

Обоснована важность представления сигнала пучком лучей (волн), обусловленных неоднородностями среды, когда в пределах пучка «выбираются» точки отражения, где f_0 выше, чем для регулярной ионосферы. При этом условие равенства МПЧ скачков и $МНЧ_n F_2$ ($n > 1$) косвенно учитывает случайные неоднородности среды, что важно, так как их непосредственный учет затруднен отсутствием прогностических моделей и соответствующих методов расчета.

Приведен алгоритм расчета МНЧ, углов излучения, приема и задержек радиоволн методом равных МПЧ, который для дальностей, близких к предельным для траекторий nF_2 , переходит в известный метод "контрольных точек".

Показано, что введение понятия эффективной критической частоты отражающего слоя $f_{0\text{э}}$ как суммы средней f_0 и амплитуды ее случайного возмущения повышает точность прогнозов $МНЧ_2 F_2, 3F_2$ методом равных МПЧ. При этом радиоволны с $f \approx МНЧ_n F_2$ для заданной трассы отражаются областями ионосферы с $f_0 \approx f_{0\text{э}}$, что возможно, так как поле на трассах $D > 2000$ км формирует область ионосферы размером несколько сотен км, отражающая в пункт приема пучок лучей. Приведены вариации азимутов радиоволн с $f \approx МНЧ_2 F_2$, показывающие «захват» области отражения радиоволн КМН, которая движется поперек трассы. Показано, что использование $f_{0\text{э}}$ устраняет превышение измеренных β_p над рассчитанными для регулярной ионосферы (см. 2.3). Приведен быстродействующий алгоритм расчета характеристик многоскачковых модов распространения, что важно для ряда прикладных прогностических задач.

В 3.5 расчетные $МНЧ_1 F_2, 2F_2, 3F_2$ сравниваются с измеренными в различных условиях на 4-х трассах НЗ. Используются данные станций ВЗ, расположенных в окрестностях экспериментальных трасс. Показано, что метод равных МПЧ точнее известных методов расчета МПЧ, особенно в условиях сильных изменений параметров ионосферы вдоль трасс, когда применение этого метода дает более точные, чем метод характеристик, прогнозы моментов начала прохождения модами $2F_2, 3F_2$, а также углов места и задержек этих модов.

Даны и оценки точности различных методов расчета МНЧ в сочетании с прогностическими моделями ионосферы, что важно для прикладных задач. Предлагаются методы коррекции этих моделей по оперативным данным ВЗ и НЗ. Экспериментально показано, что систематические ошибки прогнозов МНЧ разработанными методами меньше случайных ошибок, за исключением ночных часов суток зимой на субполярных трассах с более интенсивными

случайными неоднородностями ионосферы. Метод прогнозирования влияния таких неоднородностей на характеристики радиоволн предложен в 5.3.

В 3.6 предлагаются методы оперативных прогнозов (ОП) МНЧ по данным НЗ ионосферы, основанные на определении эффективных индексов солнечной активности W_3 по измеренным МНЧ, и применении этих индексов для коррекции моделей ионосферы. При этом индексы W_3 определяются путем итераций до совпадения измеренных МНЧ с рассчитанными по методам 3.3,3.4, что возможно в режиме реального времени ввиду быстрогодействия разработанных методов. В результате решаются задачи ОП характеристик радиоволн для данной (опорной) трассы НЗ и трасс, не обеспеченных средствами НЗ, что особенно важно для радиосвязи с подвижными объектами.

Показана возможность решения задач ОП и при определении индексов W_3 по моментам начала и (или) окончания прохождения радиоволн на опорных трассах. При этом повышена точность определения МНЧ и углов приема мода 2F2 по сравнению с долгосрочным прогнозом (ДП) для трассы Москва-Иркутск, где в январе при $W_{3000}F_2$ менялись от $\approx 30^\circ$ утром до $\approx 5^\circ$ вечером, что согласуется с измеренными β_2 , но не прогнозируется другими методами.

Показана более высокая точность разработанного ОП по сравнению с ДП для субполярных трасс, где систематические ошибки расчетов МНЧ существенно выше, чем для среднеширотных трасс, и зимой больше, чем летом. Однако для ОП по данным НЗ систематические ошибки определения МНЧ практически отсутствуют, включая аномально высокие МНЧ зимней ночью и пересчет данных НЗ с трассы на трассу. Отмечена возможность применения разработанных методов для решения задач ОП на большом числе радиолиний. Показано, что зимой для высоких широт поправка, учитывающая влияние КМН на МНЧ (см. 3.4), существенно выше, чем в средних широтах, не только ночью, но и днем. Обращено внимание еще на одну причину систематических ошибок пересчета данных ВЗ в МНЧ, обусловленную занижением измеряемых при ВЗ медиан критических частот по сравнению с реальными медианами для ионосферы с интенсивными КМН. Поэтому разработанный ОП, основанный на данных НЗ, наиболее эффективен для высокоширотных радиолиний.

В заключении к разделу 3 сформулированы результаты исследований распространения радиоволн с $f \approx$ МНЧ, и обоснована необходимость более детального задания неоднородной структуры ионосферы.

В разделе 4 разработаны методы диагностики параметров регулярной и случайной структур ионосферы по измеренным угловым характеристикам наклонного распространения и приведены результаты такой диагностики, которые анализируются с целью решения задач ОП и ДП характеристик радиоволн.

В 4.1 получено выражение, связывающее СКО азимутов при НЗ ионосферы (S_1) и СКО «наклонов» отражающего слоя при ВЗ для сферической среды:

$$S_1 / S_{01} \approx 1 + h / R_E \times (1 + h / R_E - \cos d) / \sin d,$$

где $d = D / 2R_E$, h — действующая высота отражения радиоволн.

Показана возможность применения этого выражения для определения СКО крупномасштабных «наклонов» слоя F2 по измеренным азимутам мода 1F2.

В 4.2 показано превышение измеренных СКО азимутов модов 2F2 над рассчитанными, особенно для $f \approx \text{MНЧ2F2}$. Делается вывод о более существенном влиянии случайных неоднородностей ионосферы на характеристики многоскачкового распространения радиоволн по сравнению с односкачковым, что обусловлено: 1) возрастанием интенсивности КМН ионосферы с ростом высот отражения радиоволн; 2) "захватом" области отражения радиоволн при движении КМН поперек трассы, что характерно при $f \approx \text{MНЧ2F2}$ (см. 3.4).

В 4.3 анализируются параметры быстрых флуктуаций разностей фаз ϕ радиоволн в разнесенных антеннах для верхнего и нижнего лучей с различными высотами отражения от слоя F2. Показано, что: 1) существенный вклад в рассеяние радиоволн вносят неоднородности, расположенные вблизи нижней границы слоя F2; 2) в области отражения верхних лучей рассеивающая способность неоднородностей S убывает с ростом высоты; 3) рост флуктуаций ϕ запаздывает на ≈ 8 ч от роста K_p -индексов геомагнитной активности, что связано с конечной скоростью (~ 100 м/с) перемещения возмущений ионосферы из полярных регионов до средних широт. Такое запаздывание важно учитывать в прогнозах влияния неоднородной структуры ионосферы на характеристики радиоволн. Сделан вывод о новых возможностях диагностики неоднородной структуры ионосферы с размерами ~ 1 км, основанных на измерениях разностей фаз радиоволн в разнесенных антеннах. Важно, что эта информация извлекается из данных о флуктуациях наклонно отраженных от ионосферы радиоволн, характеристики которых прогнозируются для решения прикладных задач.

В 4.4 разработаны методы и приведены результаты диагностики КМН в областях отражения радиоволн по данным об угловых и частотных характеристиках радиоволн. Показана возможность определения критических частот ионосферы по измеренным углам места верхних лучей β_p . С этой целью получено выражение для расчета f_0 в точке K , определение которой дано выше в 2.3:

$$f_0 \approx f [1 - \cos^2 \beta_p(f) / (1 + h_m / R_E)^2]^{1/2}$$

На основе расчетов показано, что СКО ошибка измерений f_0 этим методом $\approx 2\%$ от измеренного значения, что существенно меньше ошибок ДП, превосходящих 10%. Приведены методика и результаты оценки точности определения f_0 по измеренным β_p и τ_p . Показано, что эта оценка близка к теоретической оценке. Для радиуса существенного изменения f_0 получено значение ≈ 250 км, соответствующее средним размерам КМН в области максимума слоя F2.

Получено выражение для СКО случайных вариаций углов места верхних лучей S_{β} по относительным СКО вариаций f_0 (σ_{f_0} / f_0).

$$S_{\beta} \approx (\sigma_{f_0} / f_0) \alpha^2 / \{ [1 - (1 + h_m / R_E)^2 + (1 + h_m / R_E)^2 \alpha^2] (1 - \alpha^2) \}^{1/2},$$

которое, как показано экспериментально, можно применять в прогнозах диапазонов случайных вариаций β_p и для диагностики случайных изменений f_0

на трассах НЗ, не обеспеченных станциями ВЗ ионосферы.

Таким образом, впервые обоснована возможность измерения основного параметра ионосферы - критической частоты - при НЗ на фиксированной рабочей частоте f в отличие от известных методов измерения f_0 , основанных на изменении f . Показаны преимущества диагностики критических частот ионосферы разработанным методом по сравнению с диагностикой f_0 на основе сети станций ВЗ, использование которых не дает разрешение по пространству в 200-300 км, соответствующее радиусам изменений f_0 . При этом диагностика f_0 по измеренным β_r более, чем в 3 раза повысит точность ОП МПЧ трасс, середины которых лежат на расстояниях <250 км от точек измерений f_0 . Максимальный эффект можно ожидать при измерениях зависимостей $\beta_r(f)$, что позволит получать изменения f_0 от пункта измерений до середины трассы НЗ.

Важная особенность разработанного способа определения f_0 , признанного изобретением, заключается в возможности измерений β_r в пассивном режиме (без излучений специального вида) для радиостанций различного назначения, например, вещательных, удаленных от пункта измерений на 2000-4000 км. При этом верхние лучи выделяются по доплеровскому сдвигу, с использованием антенных решеток или аналитического разделения лучей. При измерениях β_r и τ_r можно определять f_0 над районами, недоступными для размещения станций ВЗ. При этом нет необходимости сбора данных с сети станций ВЗ.

В 4.5 обоснованы методы коррекции прогнозируемых f_0 по измеренным характеристикам модов 2F2, 3F2. Приведено выражение для определения f_0 в вершинах эквивалентных скачков по измеренным МНЧ2F2(3F2) и МНЧ этих модов, прогнозируемым методом равных МПЧ (3.4). При сравнении с результатами измерений для трассы Москва-Иркутск, обеспеченной данными ВЗ, показано устранение систематических ошибок ДП f_0 . Для уменьшения случайных ошибок ОП МНЧ предложен более точный метод коррекции f_0 , основанный на измерениях углов места и МНЧ мода 2F2 и применении метода равных МПЧ.

В заключении к разделу 4 сделан вывод о разработке основ диагностики неоднородной структуры ионосферы по экспериментальным данным об угловых характеристиках радиоволн на трассах НЗ. Результаты диагностики использованы в следующем разделе при разработке моделей среды и методов прогнозирования влияния этой структуры на характеристики радиоволн.

В разделе 5 разработан метод и приведены результаты моделирования влияния случайных неоднородностей ионосферы на средние характеристики радиоволн. Во введении к разделу обращено внимание на важность экспериментальной проверки методов расчета характеристик распространения радиоволн в случайно-неоднородной ионосфере и обсуждаются возникающие при этом проблемы, обусловленные отсутствием прогностических моделей для неоднородностей различных размеров и сложностью расчетов. Решение этих проблем является одним из основных результатов раздела и представляемой работы.

В 5.1 предложен метод расчета характеристик радиоволн, отраженных случайно-неоднородной ионосферой, в котором учтено: 1) рассеяние радиоволн вперед на восходящих участках траекторий; 2) случайные преломления радиоволн через ионосферу или случайные изменения их углов при отражениях от КМН ионосферы; 3) прохождение радиоволн над земной сферой (рикошетирующее), обусловленное их рассеянием вперед на нисходящих участках траекторий; 4) многолучевость принятого сигнала, обусловленная неоднородной структурой ионосферы. Предлагаемый метод можно проверять экспериментально и применять в радиопрогнозах благодаря четкому определению модели неоднородной структуры ионосферы и способов задания модельных параметров.

Обоснована модель рассеивающих радиоволны неоднородностей ионосферы в виде слоя, локализованного вблизи нижней границы слоя F2, интенсивность рассеяния в котором задается эффективным параметром S, т.е. СКО лучей, падающих на рассеивающий слой, вперед от их первоначального направления. Для этой модели предложен алгоритм расчета характеристик радиоволн, отраженных горизонтально-однородным слоем и рассеянных ниже этого слоя.

Согласно предложенному алгоритму поле, излучаемое антенной, представлено пучком лучей с заданными углами. После прохождения рассеивающего слоя на восходящих и нисходящих участках траекторий направления этих лучей меняются по нормальному закону с нулевым средним и СКО=S. Преломленные лучи и лучи, проходящие над Землей, в дальнейшем исключаются. Отмечено, что наличие таких лучей является главной причиной отличий средних характеристик радиоволн от рассчитанных для регулярной ионосферы.

Для проходящих на поверхность Земли лучей рассчитываются средние для заданного интервала дальностей от источника Δ_D углы излучения η , приема β , задержки, а также СКО от этих средних σ_β и относительные энергетические потери, учитывающие фокусировку и дефокусировку поля в неоднородной среде. Для расчета этих потерь предлагается формула, где k – количество лучей, попадающих в интервал Δ_D , δ – шаг по углу излучения, D – дальность трассы:

$$L = 10 \lg \{ [R_E \Delta_D \sin(D/R_E) \sin \beta] / (k \cos \eta) \}, \text{ дБ}$$

Отмечено, что, меняя параметр рассеяния S, можно обеспечить совпадение измеренных и рассчитанных σ_β , т.е. определить значение S в условиях конкретного эксперимента и использовать это значение в расчетах и прогнозах других характеристик радиоволн. Именно эта возможность позволила выполнить достаточно строгую экспериментальную проверку предлагаемого метода для полного набора характеристик радиоволн, включая энергетические.

Затем предложенный алгоритм развит для расчета эффектов рассеяния и отражения радиоволн от слоя с регулярными градиентами критической частоты и высоты, а также для многократных отражений от такого слоя. Учтено и влияние КМН ионосферы в областях отражения радиоволн, для чего использована модель в виде квазисинусоидальных отклонений критических частот и высот ионосферы от их средних значений, меняющихся вдоль трассы. Параметры этой

модели задаются из f-графиков ВЗ и СКО отклонений углов прихода радиоволн от зенита при ВЗ, либо СКО азимутов мода 1F2 (см. 4.1). Используются также данные о направлениях движения КМН из работ Э.Л. Афраймовича и др.

В 5.2 выполнено моделирование влияния случайных неоднородностей ионосферы на средние характеристики траекторий радиоволн, что необходимо для интерпретации результатов измерений, приведенных в разделе 2. Показан рост средних углов приема для мода 1F2 под действием случайных неоднородностей ионосферы, достигающий 6° зимой при повышенной интенсивности этих неоднородностей (см. 1.3,2.2), влияние которых уменьшает влияние градиентов параметров регулярной ионосферы на углы излучения и приема радиоволн. При этом прогноз влияния случайных неоднородностей среды разработанными методами практически устраняет такие систематические ошибки.

Объяснен рост случайных вариаций углов места мода 1F2, наблюдаемый согласно 1.3 в вечерние часы суток зимой, хотя в другие часы суток СКО этих углов (S_1) меньше рассчитанных по данным о «наклонах» ионосферы. Предлагается методика расчета S_1 , основанная на задании различных фаз КМН и учете многолучевости сигнала. Показано, что степень развития этой многолучевости зависит от прогнозируемого направления движения КМН относительно трассы. В условиях многолучевости утром при движении КМН под углом $\approx 45^\circ$ к трассе зависимость β_1 от фазы КМН существенно меньше, чем в условиях отсутствия многолучевости при движении КМН почти поперек трассы вечером зимой.

Объяснены превышения измеренных средних углов места (до 4°) и задержек радиоволн для мода 1E_s над прогнозами для регулярной среды, что отмечено в 2.6. Показано и увеличение дальности прохождения радиоволн модом 1E_s (см. 2.6). Максимальное увеличение этой дальности до 400 км дает рассеяние радиоволн на высотах максимума турбулентности тропосферы ≈ 9 км.

Объяснен прием радиоволн на дальностях выше предельной для мода 1F2, наблюдаемый на трассах Москва-Иркутск и Харьков-Иркутск (см. 1.6). Отмечено, что при сильных изменениях параметров регулярной ионосферы вдоль трассы эта дальность уменьшается до 3000 км, но в экспериментах такие дальности не обнаружены. Приведены результаты расчетов, учитывающие влияние случайной неоднородности ионосферы на фоне таких изменений, откуда следует возможность прохождения радиоволн модом 1F2 на дальности до 4300 км.

Объяснены превышения углов места, измеренных для f>МПЧ, над критическими углами регулярной ионосферы (см. 3.2), что возможно при повышенной интенсивности случайных неоднородностей ионосферы.

Объяснена линеаризация ионограмм НЗ при дальнем односкачковом распространении верхних лучей (см. 2.5). Показано, что учет рассеяния радиоволн улучшает соответствие измеренных и рассчитанных ионограмм НЗ, в том числе для частот, которые могут на 5 МГц превышать предельную частоту отражения радиоволн регулярным слоем F2. Уменьшение задержек верхних лучей для f<МПЧ по сравнению с расчетами для регулярной среды позволяет объяснить

ионограммы HЗ с вогнутыми вниз следами верхних лучей, наблюдаемые в условиях превышений МНЧ над МПЧ. Возможны также аномально длинные сеансы наблюдений с $\tau_p < 200$ мкс (см. 2.5). Отмечено, что применение разработанного метода дает прогноз этих эффектов, не имевших надежного объяснения.

Объяснено систематическое превышение измеренных β_p над рассчитанными для регулярной ионосферы (см. 2.3, 2.4), хотя τ_p меньше рассчитанных. Показано, что поле верхних лучей формируют области положительных возмущений f_o в окрестности характерной для этих лучей точки К (см. 2.3), когда важна азимутальная фокусировка из-за отклонений их траекторий к более высоким f_o .

Приведены также результаты расчетов, показывающие наблюдаемое при HЗ уменьшение уширения импульса с ростом частоты в диапазоне МПЧ-МНЧ.

В 5.3 приведены результаты моделирования влияния случайных неоднородностей ионосферы на средние амплитуды сигнала. Эти результаты сопоставлены с результатами расчетов для регулярной среды и результатами измерений.

Показано расширение частотного диапазона прохождения верхних лучей по сравнению с регулярной средой, обусловленное рассеянием радиоволн в ионосфере. При определении параметров рассеяния S из условия $f = \text{МНЧ}$ рассчитаны наинизшие частоты верхних лучей для пороговых уровней приема. В результате можно прогнозировать верхние и нижние границы диапазонов прохождения верхних лучей, что подтверждено результатами измерений.

Прогнозируется и усиление поля верхних лучей по сравнению с регулярной ионосферой для $f < \text{МПЧ}$, а также резкая отсечка поля этих лучей на более низких частотах, что наблюдается на ионограммах HЗ и АЧХ верхних лучей. Показана возможность определения параметра рассеяния S и по условию совпадения измеренной и рассчитанной крутизны АЧХ для мода 2F2 при $f > \text{МПЧ}2F2$ и прогнозирования по этому параметру средней формы АЧХ мода 1F2p. Приведены результаты измерений, показывающие дополнительную модуляцию АЧХ, обусловленную азимутальной фокусировкой поля верхних лучей крупномасштабными неоднородностями ионосферы.

Для практических приложений важное значение имеет показанная в 5.3 возможность прогнозирования МНЧ1F2 при определении параметров рассеяния S по измеренным ширинам пучков верхних лучей в вертикальной плоскости.

Объяснены аномальные превышения МНЧ1F2 над МПЧ, наблюдаемые зимой ночью на субполярных трассах. Показано, что при сильных возмущениях среды определяющее влияние на МПЧ оказывает амплитуда возмущений критических частот, когда при $f \approx \text{МНЧ}$ радиоволны ограждаются областями ионосферы с положительными возмущениями этих частот (см. 3.4). Другие параметры случайного возмущения среды способствуют "выбору" таких областей отражения. Поэтому разработанные методы позволяют прогнозировать превышения МНЧ над МПЧ, достигающие 50% зимой ночью при $W > 100$ (см. 3.6).

Показано, что благодаря "выбору" луча с наибольшей МПЧ из лучей, отраженных крупномасштабными неоднородностями слоя E₂ ионосферы, объясня-

ются существенные (до 2-х раз) превышения МНЧ радиоволн, отраженных этим слоем на трассах $D \approx 1000-2200$ км, над МПЧ1E_s, рассчитанными по данным ВЗ (см. 2.6). Для таких трасс показано соответствие измеренных и рассчитанных коэффициентов отражения радиоволн УКВ диапазона неоднородной ионосферой, когда для $D > 1600$ км более важно рассеяние УКВ мелкомасштабными неоднородностями среды, а на более коротких трассах важны отражения от крупномасштабных положительных возмущений плазменных частот слоя E_s.

Приведены результаты измерений и расчетов, которые показывают прохождение радиоволн с $f > \text{МПЧ}$, обусловленное генерацией случайных неоднородностей ниже слоя F2 ионосферы под действием солнечной вспышки класса 2B.

Исследован эффект уменьшения напряженностей поля вблизи предельных дальностей распространения модом 1F2 (см. 2.7). Рассмотрены 4 причины ослабления поля радиоволн из-за рассеяния их случайными неоднородностями ионосферы: 1) преломление лучей через ионосферу; 2) отток энергии в "мертвую" зону передатчика, рассчитанную для регулярной ионосферы; 3) рикошетирующее отражение лучей над сферической поверхностью Земли; 4) отток энергии на дальности, превышающие предельную для одного скачка в регулярной среде. Показано, что причины 1,2 важны для верхних лучей и радиоволн с $f > \text{МПЧ}$, а для нижних лучей при $f < \text{МПЧ}$ более важны причины 3,4. При расчетах получены близкие к наблюдаемым дополнительные потери в напряженности поля по сравнению с регулярной ионосферой 5 дБ для мода 1F2 и 10 дБ для мода 2F2.

Показана возможность прогнозов приема радиоволн на частотах выше предела отражения регулярным слоем F2. В результате экспериментальная зависимость $E(D)$ из 2.7 объяснена при определении параметра рассеяния $S \approx 3^\circ$ по значению dE/dD . Объяснено и уменьшение напряженностей поля радиоволн на дальностях, близких к предельным для мода 2F2 (см. 2.7), для чего использован параметр $S = 3^\circ$, удовлетворяющий зависимости $E(D)$ из 2.7. Показано также, что учет рассеяния радиоволн позволяет прогнозировать уменьшение крутизны дистанционно-частотных характеристик ВНЗ ионосферы для $D > 2000$ км.

Подраздел 5.4 посвящен обоснованию и развитию оперативных методов расчета МНЧ, предложенных в 3.3, 3.4. На основе результатов моделирования для неоднородной среды показано, что метод расчета МНЧ1F2 (см. 3.3) применим в условиях умеренной возмущенности ионосферы (зимний день в средних широтах при $W < 50$). При более сильных возмущениях ионосферы, наблюдаемых, например, зимней ночью на субполярных трассах, необходимо задавать параметры рассеяния S и амплитуды возмущения критических частот (см. 5.3).

Дано расчетное обоснование метода равных МПЧ, разработанного в 3.4 для оперативных расчетов характеристик радиоволн. Анализируются частотные зависимости характеристик распространения радиоволн модом 2F2, рассчитанные методом 5.1, на основе чего объяснены разные знаки отклонений измеренных средних β_1 и β_2 от рассчитанных для регулярной ионосферы (см. 2.2). Показано, что рост β_2 и β_3 после начала прохождения модами 2F2, 3F2 вызван рос-

том f_0 и смещением вершин скачков от границ конусов рассеяния радиоволн к серединам конусов. При этом групповые задержки уменьшаются, так как траектории скачков становятся более симметричными и падают высоты отражения. Обоснованы важные выводы, согласно которым неоднородности ионосферы:

1) уменьшают влияние горизонтальных градиентов параметров регулярного слоя F2 на характеристики распространения модом 1F2;

2) усиливают влияние этих градиентов на характеристики мода 2F2.

Показано, что амплитуды сигналов, соответствующие разным параметрам S, отличаются незначительно именно вблизи порогов приема сигналов, когда МНЧ, рассчитанные методом 5.1, близки к МНЧ, рассчитанным методом равных МПЧ. При этом зависимость МНЧ2F2(S) можно не учитывать при сильных градиентах f_0 вдоль трасс $D > 2000$ км, когда метод равных МПЧ наиболее эффективен. В результате дано более строгое обоснование метода равных МПЧ и объяснен ряд экспериментальных фактов, обусловленных влиянием неоднородности среды на средние характеристики модов 2F2, 3F2, в том числе превышение измеренных МНЧ2F2 над рассчитанными методом равных МПЧ для условий слабой горизонтальной неоднородности регулярной ионосферы, что наблюдается вблизи полудня и полуночи, когда прогнозирование МПЧ методом, предложенным в подразделе 5.1, улучшает согласие с результатами измерений.

В заключении к разделу 5 делается вывод о возможности прогнозирования влияния неоднородности ионосферы на средние характеристики радиоволн для трасс длиннее 2000 км на основе методов, предложенных в подразделе 5.1 и проверенных при анализе большого числа наблюдаемых эффектов в 5.2 - 5.4.

В разделе 6 приведены результаты экспериментальных исследований сверхдальнего распространения радиоволн, выполненных при уровнях активности Солнца $W \approx 10-200$ на 6-ти трассах длиной от 35900 км до 75900 км.

В 6.1 дано описание методик измерений амплитуд и угловых характеристик радиоволн для кругосветных сигналов (КС), обратных сигналов (ОС), прямых кругосветных сигналов (ПКС) и сигналов, кратных обратному (2ОС).

В 6.2 обоснована модель сигнала при сверхдальнем распространении радиоволн. Анализируются результаты измерений флуктуаций амплитуд и разностей фаз сигнала для разных коэффициентов корреляции поля ρ в разнесенных антеннах. Показана возможность описания этих флуктуаций моделью случайного нормального и стационарного в течение ~ 100 с процесса, что обусловлено суммарным влиянием большого числа неоднородностей на поле радиоволн. Разработана методика измерений параметров углового спектра мощности двухпучкового квазинепрерывного сигнала и приведены экспериментальные данные, свидетельствующие в пользу такой модели для ОС.

В 6.3 показано наличие компонент углового спектра ОС, ПКС с углами места, которые близки к критическим углам ρ_c , рассчитанным по параметрам регулярной ионосферы в пункте приема. На основе анализа измеренной частотной зависимости углов места ОС показано, что эти компоненты формируют верхний

пучок лучей в модели 6.2 и вклад этих компонент растет с ростом отношений f/f_0 , а также с ростом активности Солнца, когда возрастает и интенсивность случайных неоднородностей ионосферы. Показан также непосредственный прием ОС и ПКС с $\beta \approx \beta_c$, что наблюдалось при высокой активности Солнца в интервалы времени, существенно отличные от оптимальных для сверхдального распространения радиоволн, когда скачковые моды сильно поглощаются в ионосфере. Приведены результаты впервые выполненных измерений углов места 2ОС и показана их корреляция с углами места ОС. Отмечено, что для объяснения приема ОС и ПКС с $\beta \approx \beta_c$ необходимо моделирование процессов сверхдального распространения радиоволн с учетом неоднородности ионосферы.

В 6.4 анализируются результаты измерений азимутальных углов прихода радиоволн на сверхдальных трассах. Показано, что среднесквадратичные отклонения азимутов в 2-5 раз меньше рассчитанных для скачкового распространения радиоволн и отличие от этих расчетов растет с ростом активности Солнца. При $W > 100$ отсутствует зависимость средних азимутов ОС от местного времени в пункте приема, наблюдаемая при $W < 50$, когда наличие этой зависимости говорит о существенном вкладе скачковых модов в поле сигнала.

Для объяснения этих результатов в 6.5 рассмотрена роль волноводных модов, не имеющих отражений от Земли. Учтено, что один из механизмов возбуждения этих модов обусловлен рикошетированием над сферической поверхностью Земли после рассеяния радиоволн ниже областей отражения (см. 5.3), когда вероятность рикошетирования растет с ростом активности Солнца из-за увеличения интенсивности случайных неоднородностей ионосферы. Учтено и уменьшение вклада скачковых модов в поле ОС с ростом активности Солнца, обусловленное ростом поглощения в слоях D, E ионосферы, что показано при сравнении измеренных напряженностей поля с рассчитанными для этих модов.

Отсюда следует: 1) роль волноводных модов дальнего распространения радиоволн растет с ростом активности Солнца; 2) для этих модов характерен существенно меньший по сравнению со скачковыми случайный разброс азимутов при систематическом отклонении их от направления на передатчик; 3) рост напряженности поля ОС с ростом активности Солнца обусловлен ростом интенсивности случайных неоднородностей ионосферы, способствующих возбуждению волноводных модов. В результате показана возможность диагностики способов дальнего распространения радиоволн при измерениях их азимутов.

В разделе 7 анализируются перспективы применения результатов работы для долгосрочного и оперативного прогнозирования характеристик распространения радиоволн. В 7.1 рассматриваются вопросы измерений угловых характеристик непрерывных радиосигналов для диагностики параметров регулярной и неоднородной структуры ионосферы, в том числе эффективных критических частот, введенных в 3.4 для уточнения прогнозов МНЧ. Показано, что эти вопросы решаются при фазоразностных измерениях для 5-ти образующих прямой угол антенн, одна из сторон которого близка к направлению на передатчик

В 7.2 рассматривается применение средств наклонного и трассового зондирования ионосферы, измеряющих ВЧХ и АЧХ, для определения параметров рассеяния S , введенных в 5.1 с целью прогнозирования влияния неоднородностей ионосферы на средние характеристики радиоволн. Показаны возможности определения параметра S по превышениям МНЧ над МПЧ, крутизне АЧХ в области высоких частот, при измерениях флуктуаций разностей фаз сигналов в разнесенных антеннах. Имеющиеся массивы экспериментальных данных позволяют создать модель пространственно-временных изменений S , где максимальные $S \approx 5^\circ$ наблюдаются при $W > 100$ ночью зимой в полярных регионах, а минимальные $S \approx 0,5^\circ$ - днем в равнотропиках на средних широтах при $W \approx 10$.

Показаны преимущества эффективных индексов активности Солнца W_3 , определяемых по оперативным данным НЗ (см. 3.6), по сравнению с долгосрочными прогнозами W . В результате разработан новый подход к оперативному прогнозированию (ОП) характеристик радиоволн, основанный на диагностике параметров регулярной и случайно-неоднородной структуры ионосферы по характеристикам наклонного распространения радиоволн. При этом параметры W_3 и S , определяемые для одного мода и трассы, можно использовать для других модов и трасс, что важно для радиосвязи с подвижными объектами.

Для решения задач ОП в реальном времени на большом числе радиолиний необходимы быстросействующие методы расчета характеристик радиоволн. Применение таких методов, разработанных в диссертации, обсуждается в 7.3.

В подразделах 7.4-7.7 обсуждается применение разработанных прогнозов для получения практически важных результатов, таких как: 1) расширение диапазонов дальностей и частот приема; 2) использование диапазонов одностороннего прохождения радиоволн с целью повышения скоростей передачи информации; 3) оптимизация диаграмм направленности антенн для повышения уровней полезного сигнала в пункте приема, а также селекции (раздельного приема) модов распространения, что повышает надежность и скорость передачи информации; 4) настройки КВ радиостанций на оптимальные рабочие частоты при минимальном числе перестроек; 5) повышения точности пеленгации.

В заключении к разделу 7 сформулированы основные ожидаемые результаты от применения разработанного ОП, основанного на данных НЗ, согласно которым повышение эффективности радиотехнических систем диапазона 3-60 МГц достигается благодаря: 1) диагностике критических частот ионосферы на удалении до 2000 км от пункта измерений, в том числе пассивными средствами, уточнению и совершенствованию моделей среды при определении эффективных индексов активности Солнца и параметра, характеризующего рассеяние радиоволн; 2) прогнозу основных характеристик сигнала для большого числа радиолиний путем расчетов по методам, учитывающим регулярную и случайную неоднородность ионосферы, и адаптации радиотехнических систем к условиям распространения радиоволн путем выбора оптимальных рабочих частот, углов излучения и приема, скоростей передачи информации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Таким образом, получен ряд достижений, имеющих важное значение для прогнозирования характеристик дальнего распространения радиоволн в связи с проблемой учета влияния неоднородности ионосферы на эти характеристики. Разработаны и экспериментально проверены методы, применение которых позволит более, чем в 2 раза уменьшить систематические ошибки известных прогнозов углов приема, МПЧ, МНЧ, напряженностей поля и относительных задержек радиоволн на дальних трассах, что говорит о достижении цели работы. Сформулируем основные результаты диссертации.

1. При проведении экспериментов и анализе полученных данных обнаружены неизвестные ранее закономерности регулярных и случайных изменений угловых характеристик радиоволн на трассах длиннее 2000 км, такие как:

а) существенные регулярные изменения углов места для основных модов распространения в течение суток, разные для разных месяцев и обусловленные изменением параметров, характеризующих неоднородность ионосферы;

б) уменьшение диапазонов изменений углов приема для мода 1F2 в течение суток при увеличении этих диапазонов для модов 2F2, 3F2, наиболее ярко выраженное зимой на широтных трассах при высокой активности Солнца;

в) определяющее влияние эффективных критических частот ионосферы, учитывающих отражение радиоволн от областей ионосферы с положительными возмущениями плотностей электронов, на углы приема верхних лучей;

г) прием радиоволн на частотах выше МПЧ вблизи критических углов;

д) превышение измеренных дисперсий азимутов мода 2F2 над рассчитанными по данным о дисперсиях "наклонов" слоя F2 ионосферы, возрастающее до 2-3 раз для $f \approx \text{MНЧ}2\text{F2}$ и обусловленное "захватом" области отражения при движении положительного возмущения плотности электронов поперек трассы;

е) запаздывание роста рассеяния радиоволн в средних широтах на 5-8 часов относительно роста K_p -индексов геомагнитной активности, рост рассеяния радиоволн на дальних трассах в момент солнечной вспышки класса 2В.

Разработаны методы, позволяющие в 3-5 раз уменьшить систематические ошибки известных прогнозов углов приема радиоволн на дальних трассах.

2. Разработаны и экспериментально проверены методы определения параметров регулярной и случайно-неоднородной структур ионосферы, необходимых для уточнения прогнозов характеристик радиоволн, таких как:

а) эффективных критических частот ионосферы по углам приема, задержкам верхних лучей, углам приема и МНЧ для мода 2F2;

б) дисперсий эффективных крупномасштабных наклонов слоя F2 ионосферы по дисперсиям азимутов мода 1F2, дисперсий эффективных критических частот ионосферы по дисперсиям углов места верхних лучей;

в) эффективных параметров S рассеяния радиоволн неоднородностями ионосферы по эффективным ширинам углового спектра мощности для верхних

лучей, превышениям МНЧ над МПЧ, наклонам АЧХ для частот выше МПЧ.

На основе этих методов, основанных на измерениях характеристик наклонного распространения радиоволн для опорных трасс, получены новые данные о неоднородной структуре ионосферы, в том числе показано, что:

а) известные прогностические модели ионосферы уменьшают градиенты критических частот слоя F2, особенно утром зимой при индексах солнечной активности $W > 100$;

б) параметры S меняются от $0,5^\circ$ днем в равноденствие на средних широтах при $W < 50$ до 5° зимой ночью на высоких широтах при $W > 100$;

в) зимой неоднородности среднелинейной ионосферы различных размеров более чем в 2 раза интенсивнее по сравнению с равноденствием;

г) рассеяние радиоволн неоднородностями слоя F2 убывает с высотой.

3. Разработаны и экспериментально проверены оперативные методы расчета характеристик радиоволн, учитывающие неоднородность ионосферы:

а) метод равных МПЧ, который точнее известных методов расчета МНЧ и углов места для модов 2F2, 3F2 на частотах, близких к этим МНЧ;

б) метод расчета МНЧ модов 1F2 и верхних лучей (при отсутствии мода 1F2), основанный на обнаруженном эффекте приема вблизи критических углов;

в) методы расчета МПЧ для горизонтально-неоднородной ионосферы;

г) метод расчета углов приема и задержек верхних лучей;

д) метод оперативных прогнозов (ОП), основанный на определении эффективных индексов активности Солнца и параметров S по данным НЗ.

Показано, что применение разработанных методов позволит в ≈ 3 раза уменьшить систематические и случайные ошибки долгосрочных прогнозов МНЧ, уменьшает ошибки известных ОП МНЧ, основанных на данных ВЗ.

4. Разработан и экспериментально проверен метод моделирования влияния случайных неоднородностей ионосферы на характеристики распространения радиоволн, позволяющий прогнозировать наблюдаемые отличия средних характеристик радиоволн от рассчитанных для регулярной ионосферы, такие как:

а) увеличение средних углов приема до 4° , 6° , 14° для модов 1E_s, 1F2, 2F2 соответственно и уменьшение этих углов до 9° для мода 2F2 при уменьшении критических частот ионосферы от передатчика к приемнику;

б) рост дальностей прохождения до 1000 км (мод 1F2) и 400 км (мод 1E_s);

в) линеаризация время-частотных характеристик дальнего распространения верхних лучей и уменьшение задержек этих лучей до 500 мкс для $f < \text{МПЧ}$;

г) расширение диапазона прохождения верхних лучей до 5 МГц в область частот выше предельной для отражения от регулярной ионосферы при усилении и низкочастотной отсечке поля верхних лучей на частотах ниже МПЧ;

д) уменьшение напряженностей поля вблизи предельных дальностей прохождения модами 1F2, 2F2 до 10-ти раз по сравнению с известным прогнозом.

Показаны возможности прогнозирования характеристик радиоволн для частот выше классических МПЧ 1F2, 2F2, в том числе в периоды вспышек на

Солнце и для аномальных превышений этих МПЧ, достигающих 50% зимней ночью на субполярных трассах и 100% для модов $1E_s$, в том числе при сверхдальнем распространении УКВ. Объяснен рост углов места модов $2F2, 3F2$, наблюдаемый при уменьшении их задержек, рост эффективных ширин угловых спектров этих модов в 2-3 раза при уменьшении отношений $f/MPЧ2F2(3F2)$.

Выявлены основные причины изменений средних характеристик радиоволн под действием случайных неоднородностей среды: 1) наличие углов отсечки, ограничивающих спектр мощности рассеянных волн сверху (преломление) и снизу (рикошетирующее над Землей); 2) многолучевость, когда энергия источника излучения достигает пункта приема вдоль большого числа независимых каналов (траекторий) и поле формирует достаточно протяженные области ионосферы, где происходит "выбор" энергетически выгодных траекторий радиоволн, в среднем отличающихся от траекторий в регулярной среде.

5. При экспериментальных исследованиях на сверхдальних трассах впервые обнаружены прогнозируемые зависимости угловых характеристик обратных сигналов (ОС) от сезона и активности Солнца. Показано:

- а) отсутствие регулярных суточных вариаций азимуты ОС для высокой активности Солнца и наличие таких зависимостей при низкой активности ($W < 50$);
- б) превышение рассчитанных дисперсий азимуты в 2-5 раз над измеренными, максимальное при высокой активности Солнца ($W > 100$);
- в) возможность приема сигналов на сверхдальних трассах с углами места, близкими к критическим углам регулярной ионосферы.

Полученные результаты объяснены повышением роли волноводных модов дальнего распространения радиоволн с ростом активности Солнца, что обусловлено увеличением интенсивности случайных неоднородностей ионосферы и возрастанием вероятности возбуждения рикошетирующих траекторий.

6. Показаны возможности применения полученных результатов в системах дальней радиосвязи, вещания, пеленгации, локации, обусловленные развитием и уточнением прогнозов диапазонов рабочих частот, дальностей распространения радиоволн, напряженностей поля, групповых задержек, оптимальных углов излучения и приема, модового состава радиосигнала. Разработаны предложения по созданию и применению технических средств, позволяющих осуществлять диагностику параметров регулярной и неоднородной структур ионосферы на основе измерений характеристик наклонного распространения радиоволн.

Таким образом, выявлены неизвестные ранее особенности процесса дальнего распространения радиоволн по сравнению с трассами короче 2000 км, в частности, показаны существенные отличия измеренных средних характеристик радиоволн от рассчитанных для моделей регулярной ионосферы. Разработаны методы долгосрочного и оперативного прогнозирования этих отличий, уточняющие известные прогнозы характеристик радиоволн благодаря учету влияния неоднородности ионосферы, что важно для проектирования и эксплуатации радиотехнических систем, использующих частотный диапазон 3-60 МГц.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Агарышев А.И., Сажин В.И., Тинин М.В., Унучков В.Е. Об эффекте модуляции углов прихода волновыми возмущениями электронной концентрации//XI Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Часть IV.- Издательство Казанского университета. - 1975.- С.145-146.
2. Агарышев А.И., Унучков В.Е. Применение фазового пеленгатора для изучения углов прихода кругосветных сигналов//Геомagnetизм и аэрoнoмия.- 1975.-Т. 15, N 4.- С.754-755.
3. Агарышев А.И. О влиянии луча Педерсена на точность пеленгации // Геомagnetизм и аэрoнoмия.- 1976.- Т.16, N 5. - С. 929-930.
4. Агарышев А.И., Сажин В.И. О роли прикритических лучей в дальнем распространении КВ//Геомagnetизм и аэрoнoмия.-1977.-Т 17, N 6.- С 1117-1119.
5. Агарышев А.И., Унучков В.Е. О случайной и регулярной составляющих в изменении азимутов коротких радиоволн при сверхдальнем распространении//Известия высш. уч. зав. Радиофизика. - 1977. - Т. 20, N 7.- С. 1108 - 1109.
6. Агарышев А.И.,Котович Г.В.,Унучков В.Е. Экспериментальная проверка точности расчета углов прихода методом кривых передачи//Исслед. по геомagnetизму, аэрoнoмии и физике Солнца.- М.:Наука.-1977.-Вып.41.С. 176 - 179
7. Агарышев А.И., Сажин В.И. Алгоритм расчета медианных значений углов места на однокосмических трассах // Исследования по геомagnetизму, аэрoнoмии и физике Солнца.- М.: Наука.-1978.-Вып. 44.- С. 41-43.
8. Агарышев А.И. О применении фазового пеленгатора для измерения параметров многолучевого сигнала // Исследования по геомagnetизму, аэрoнoмии и физике Солнца.- М.:Наука.- 1978.- Вып. 44.- С. 66-68.
9. Агарышев А.И., Сажин В.И., Тинин М.В. Применение табличных ионосферных данных для расчета траекторных характеристик коротких радиоволн//Вопросы распространения радиоволн в высоких и средних широтах.- М.:ИЗМИРАН. - 1979. - С. 82-90.
10. Агарышев А.И.,Тинин М.В.Метод расчета критического угла в горизонтально-неоднородной ионосфере//Геомag. и аэрoн.- 1979 - Т.19, N 4.- С.748-751.
11. Агарышев А.И.,Костромин В.Д.,Унучков В.Е. Сравнение точности пеленгования коротких радиоволн при различных условиях распространения//Вопр. распростр. радиоволн в высок. и средн. широтах.-М.:ИЗМИРАН -1979.-С.78-81.
12. Агарышев А.И., Вугмейстер Б.О. О девиации углов прихода при вертикальном и наклонном отражении от слоя F2 // Исследования по геомagnetизму, аэрoнoмии и физике Солнца.- М.:Наука.- 1980.- Вып.51.- С. 60-63.
13. Агарышев А.И. Особенности сверхдального распространения декаметровых радиоволн в период высокой солнечной активности // Геомagnetизм и аэрoнoмия.- 1981 - Т. 21, N 3.- С. 472-475.

14. Агарышев А.И. Алгоритм расчета МПЧ однокачковых трасс по табличным ионосферным данным // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца.- М.:Наука.- 1981.- Вып. 55.- С. 168-172.

15. Агарышев А.И., Дубовская Г.В., Ивельская М.К. и др. Оценка применимости некоторых моделей ионосферы для расчета углов прихода декаметровых радиоволн //Техника средств связи. Серия "Системы связи".- М.:ЦООНТИ "Экос".- 1982.- Вып.4.- С. 3-8.

16. Агарышев А.И. Анализ результатов измерений характеристик декаметровых радиоволн на частотах выше максимально применимой//XIV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. Тез. докл. Ч. I.-М.:Наука.- 1984.- С.85-87.

17. [Поляков В.М.], Агарышев А.И.,Ивельская М.К.и др. К развитию методики прогноза характеристик распространения//XIV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Часть I.- М.:Наука.- 1984.- С. 173-174.

18.Агарышев А.И. Угловые характеристики при распространении декаметровых радиоволн верхним лучом//Геомаг. и аэрон.-1985.-Т.25,№4. - С. 679-681.

19. Агарышев А.И. Флуктуационные характеристики декаметровых радиоволн для разнесенных по высоте траекторий // Известия высших учебных заведений. Радиофизика.- 1985. - Т.28, N 10.- С. 1345-1347.

20. Агарышев А.И. Влияние солнечной активности на характеристики и способы распространения декаметровых радиоволн // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца.- М.:Наука.- 1985.- Вып. 71.- С. 158-165.

21. Агарышев А.И. Метод расчета максимальных наблюдаемых частот при двухскачковом распространении декаметровых радиоволн // Радиотехника.- 1985. - N 4. - С.67-70.

22. А.с. 1205736 СССР, МКИ H04b 7/22. Способ определения максимально применимых частот в диапазоне декаметровых радиоволн / А.И. Агарышев (СССР).- 3623863: Заявлено 24.05.1983г. Оpubл. 15.09.1985.

23.Агарышев А.И.,Унучков В.Е.Диапазоны изменений углов места для различных способов распространения декаметровых радиоволн//Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца.- М.:Наука.-1987.-Вып.77.- С.60-65.

24. [Polyakov V.M.], Agaryshev A.I., Guluaeva T.L. et. al. Comparison of applicability of IRI and IGU hybrid model to calculating the angles of arrival of radio waves // Abstracts of URSI XXI General Assembly, Florence, Italy. - 1984. - P. 319.

25. Агарышев А.И., [Дашев Н.Н.], Коев М.А. Экспериментальная оценка точности определения максимальных применимых частот по табличным параметрам ионосферы // Ионосферные исследования. - М.: МГК АН СССР. - 1987. - N 42. - С. 102-105.

26. [Поляков В.М.], Агарышев А.И., Ивельская М.К. и др. Оценка возможностей полумпирического моделирования ионосферы // Ионосферные исследования.- М.: МГК АН СССР.- 1987. - N 42.- С. 5-9.

27. Агарышев А.И. Нормализация флуктуаций поля при сверхдальнем распространении радиоволн // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. - М.: Наука. - 1987. - Вып. 77. - С. 66-70.

28. Агарышев А.И., Дашеев Н.Н., Королева М.А. Оценка возможностей повышения точности определения максимальных применимых частот канала распространения декаметровых радиоволн // Техника средств связи. Серия "Системы связи". - М.: ЦООНТИ "Экос". - 1987. - Вып. 5. - С. 20-27.

29. Поляков В.М., Агарышев А.И., Суходольская В.Е. и др. Долгосрочное прогнозирование свойств радиоканала на основе полуэмпирической модели ионосферы и метода характеристик // Техника средств связи. Серия "Системы связи". - М.: ЦООНТИ "Экос". - 1987. - Вып. 5. - С. 44-49.

30. Агарышев А.И., Королева М.А. Оперативный расчет максимально применимых частот радиосвязи с учетом горизонтальной неоднородности ионосферы // Радиотехника. - 1987. - N 12. - С. 74 - 76.

31. Агарышев А.И. Флуктуации углов прихода радиоволн с различными высотами отражения от ионосферы // Геомагн. и аэронаука. - 1988. - Т. 28. N2. - С. 333-335.

32. Agaryshev A.I., Ivelskaya M.K., Lopaikin S.V. et. al. Implementation of operational V.I. sounding data for updating the ionospheric models // Advances in Space Research. - 1988. - N 4. - P. 151-154.

33. Агарышев А.И., Дашеев Н.Н., Михеев С.М. Характеристики двухскачковых траекторий на частотах вблизи максимальной наблюдаемой // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. - М.: Наука. - 1988. - Вып. 80. - С. 98-105.

34. Агарышев А.И., Дашеев Н.Н. Методы решения обратных задач наклонного зондирования в условиях горизонтально-неоднородной ионосферы // Исслед. по геомагн., аэронауке и физ. Солнца. - М.: Наука. - 1989. - Вып. 88. - С. 158-165.

35. Агарышев А.И. Влияние ионосферных неоднородностей различных масштабов на максимально наблюдаемые частоты многоскачкового распространения // Всесоюзный научный семинар "Распространение радиоволн в ионосфере". Тезисы докладов. - М.: Радио и связь. - 1989. - С. 65.

36. Агарышев А.И., Дашеев Н.Н., Михеев С.М. и др. Оперативные методы расчета характеристик квазикритических траекторий радиоволн в горизонтально-неоднородной ионосфере // XVI Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Часть I. - Харьков. - 1990. - С. 212.

37. Агарышев А.И. Новые возможности оперативного прогнозирования рабочих частот радиосвязи по характеристикам квазикритических траекторий // Техника средств связи. Серия "Системы связи". - 1990. - Вып. 3. - С. 8-15.

38. Агарышев А.И., Балаганский Б.А., Боровиков В.Г. и др. Оперативный алгоритм прогнозирования рабочих частот радиосвязи и напряженности поля в диапазоне декаметровых радиоволн // Техника средств связи. Серия "Системы связи". - 1990. - Вып. 3. - С. 6-22.

39. Агарышев А.И., Иванов Ю.Б., Шеметов И.А. Возможности фазоразностного метода в исследованиях неоднородной структуры ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. - 1991. - Т.31, N 1. - С.120-125

40. Агарышев А.И., Михеев С.М., Чернова Т.И. Влияние изменений параметров ионосферы вдоль трассы на максимально применимые частоты и характеристики лучей Педерсена // Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. - М.: Наука. - 1991. - Вып. 96. - С. 116-122.

41. Агарышев А.И., Дашев Н.Н., Михеев С.М. и др. Программное обеспечение для оперативного прогнозирования рабочих частот ДКМВ радиосвязи // Межведомствен. научн. семинар "Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ диапазона." Тез. докл. - Нижний Новгород.-1991. - С.32-33.

42. Агарышев А.И., Афанасьева Л.И., Дашев Н.Н. и др. Методы прогнозирования МПЧ распространения радиоволн с учетом регулярной и случайной неоднородности ионосферы // Научно-технический семинар "Распространение и дифракция электромагнитных волн в неоднородных средах". - Москва: НТО РЭС им. А.С. Попова. - 1992. - С.124-126.

43. Агарышев А.И. Оценка влияния крупномасштабных неоднородностей ионосферы на максимально применимые частоты распространения радиоволн // Радиотехника. - 1993. - N4. - С.74-76.

44. Агарышев А.И. Регулярные эффекты случайных неоднородностей ионосферы для верхнего и нижнего одноканальных лучей //XVII Конф. по распространению радиоволн. Тез. докл. Секция 9.-Ульяновск: УлПИ. - 1993. - С. 24.

45. Агарышев А.И., Дашев Н.Н. Методы оперативного прогнозирования МПЧ по данным наклонного и вертикального зондирования ионосферы //XVIII Конф. по распростр. радиоволн. Тез. докл.Сек. 9.-Ульяновск:УлПИ.-1993.-С. 23.

46. Агарышев А.И. Эффекты неоднородностей ионосферы на ионограммах наклонного зондирования // IV Международная научно-техническая конференция "Распространение и дифракция электромагнитных волн в неоднородных средах". - Москва: РНТО РЭС им. А.С.Попова. - 1994. - С.155-158.

47. Агарышев А.И. Влияние неоднородностей ионосферы на распространение верхних лучей и радиоволн с частотами выше классической МПЧ // Геомагнетизм и аэрномия. - 1994. - Т.34, N 6. - С.112-119.

48. Агарышев А.И., Дашев Н.Н., Лукашкин В.М. и др. Анализ результатов измерений и расчетов МПЧ для субиолярных трасс//Исслед. по геомагнетизму, аэрномии и физ. Солнца. - Новосибирск: Наука. -1994. -Вып.102. -С.73-80.

49. Агарышев А.И. Возможности совершенствования прогнозов МПЧ при учете влияния регулярной и случайной неоднородности ионосферы //Исслед. по геомаг., аэрн. и физ.Солнца.-Новосибирск:Наука.-1995.Вып.103.-С.186-193.

50. Агарышев А.И. Регулярные изменения частотных характеристик радиоволн при рассеянии на случайных неоднородностях ионосферы //Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. - Новосибирск: Наука. - 1995. - Вып. 103. - С. 176-186.

51. Агарышев А.И. Новые возможности решения задач оперативного прогнозирования характеристик декаметровых радиоволн // Радиофизика и электроника: проблемы науки и обучения. - Иркутск: ИГУ. - 1995. - С.132-137.

52. Агарышев А.И. Возможности краткосрочного прогноза характеристик декаметровых радиоволн с использованием данных наклонного зондирования ионосферы//Международная конф. 100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники. 50-я научная сессия, посвященная Дню Радио. Тез. докл. Ч. II. - Москва. -1995. - С. 38-39.

53. Agaryshev A.I. Prompt prediction techniques for radio wave propagation characteristics for high-frequency radio communication systems // Proc. Second Int. Conf. on "The directions of development of radiocommunication systems and means." - Voronezh: IEE - 1995. - P.258-264.

54. Агарышев А.И. Диагностика параметров неоднородной структуры ионосферы по данным наклонного зондирования//XVIII Всероссийск. конф. по распространению радиоволн. Тез. докл. Том 1. - М.: ИРЭ РАН. - 1996. - С.223-224.

55. Агарышев А.И., Воропаев А.В., Чукавин Д.В. Влияние неоднородности тропосферы на предельную дальность односкачкового распространения декаметровых радиоволн//Российская научн.-техн. конф. по дифракции и распространению волн. Сб. докл. - Улан-Удэ: БНЦ СО РАН. - 1996. - С. 125-128.

56. Агарышев А.И., Воропаев А.В. Мониторинг критических частот ионосферы по данным наклонного зондирования//Международ. симпози. "Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно-земной физики", посвящен. 60-летию регулярных ионосферных наблюдений в России. -Томск:СФТИ.-1996.-С. 4-5.

57. Агарышев А.И., Воропаев А.В. Мониторинг критических частот слоя F2 ионосферы на основе измерений характеристик верхних лучей //Международ. сим. "Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно-земной физики", посвящен. 60-лет. регулярн. ионосферн. наблюдений в России. -Томск:СФТИ.-1996.- С. 5-6.

58. Агарышев А.И. Предельные частоты наклонного отражения радиоволн от неоднородной ионосферы // LI научная сессия, посвященная Дню Радио. Тезисы докладов. Часть I. - М.: РИГО им. А.С. Попова. -1997 - С. 211-212.

59. Агарышев А.И. Влияние случайных неоднородностей ионосферы на средние углы излучения и приема односкачковых нижних лучей//Геомagnetизм и аэрoнoмия. - 1997. - Т.37, N 4. - С.17-25.

60. Агарышев А.И., Воропаев А.В., Чукавин Д.В. Прогнозирование влияния случайных неоднородностей ионосферы на средние характеристики распространения декаметровых радиоволн // XVIII Всероссийская конф. по распространению радиоволн. Тез. докладов. Том 2. - М.: ИРЭ РАН. - 1996 - С. 388-389.

61. Агарышев А.И., Азoвский А.А. Программное обеспечение для проектирования радиосетей в диапазоне 3 МГц-20 ГГц // Информационные технологии и радиосети - 96: Первая международная научно-практическая конференция. Материалы конференции. - Омск: ОмГУ, 1996 - С. 35-36.

62. Agaryshev A.I., Kudryashev G.S. An investigation of ionospheric effects of solar flares using measurements of oblique radio wave propagation characteristics // Problems of Geospace. Proceed. of an International Conf. "Problems of Geocosmos". - Wien: Verlag der Österreichischen Acad. der Wissenschaften. - 1997. - P.37-40.

63. Agaryshev A.I. Limiting frequencies of radio wave reflection from the inhomogeneous ionosphere for vertical and oblique-incidence sounding. // Problems of Geospace. Proceedings of an International Conference. "Problems of Geocosmos". - Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. - 1997. - P.293-296.

64. Агарышев А.И. Регулярные эффекты случайных неоднородностей ионосферы при наклонном отражении радиоволн от спорадического слоя E // Геомагнетизм и аэронавигация. - 1998. Т. 38, № 3. - С.121-129.

65. Агарышев А.И. Влияние перемещающихся возмущений ионосферы на средние значения углов прихода радиоволн // Тезисы докл. Межд. конф. «Физика ионосферы и атмосферы Земли», посвященной 50-летию ионосферных исследований в г. Иркутске. - Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 1998. - С. 4-5.

66. Агарышев А.И. Влияние случайных неоднородностей ионосферы на амплитудно-дальномерные характеристики радиоволн // Тезисы докладов Международ. конф. «Физика ионосферы и атмосферы Земли», посвященной 50-летию ионосферных исследований в г. Иркутске. - Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 1998. - С.5-6.

67. Агарышев А.И., Аксаментов А.О. Влияние случайных неоднородностей ионосферы на углы прихода и предельную дальность односкачкового распространения радиоволн / XIX Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн". Тезисы докладов. Казань: - 1999. - С.258-259.

68. Агарышев А.И., Аксаментов А.О., Кузнецов А.А. Моделирование процессов сверхдального приема УКВ / XIX Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн". Тезисы докладов. Казань: - 1999. - С.445-446.

69. Агарышев А.И. Влияние случайных неоднородностей ионосферы на средние значения напряженностей поля декаметровых радиоволн / XIX Всероссий. научн. конф. "Распростр. радиоволн". Тез. докл. Казань: - 1999. - С.345-346.

70. Агарышев А.И. Частотные зависимости характеристик двухскачкового распространения радиоволн // XIX Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн". Тезисы докладов. Казань: - 1999. - С.345-346.

71. Агарышев А.И., Формалюков А.Р. Прогнозирование напряженности поля КВ с учетом влияния случайных неоднородностей ионосферы // Изв. Вост.-Сиб. отделен. метеорологич. академии. Вып.1. - Иркутск: ИрГТУ. - 1999. - С.103-109.

Сдано в набор 15.03.2000 г. Подписано в печать 16.03.2000. Формат 60×84 1/16. Бумага типограф. Печать офсетн. Усл. печ. л. 2. Уч.-изд. л. 2. Тираж 100 экз. Зак. 23.

ЛР № 020263 от 30.12.96.

Иркутский государственный технический университет.
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83.